



(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

(12) Offenlegungsschrift  
(10) DE 196 34 923 A 1

(51) Int. Cl. 6:  
**G 05 B 13/04**  
G 05 B 17/00  
H 02 P 7/00  
G 01 M 15/00

B (2)

(21) Aktenzeichen: 196 34 923.0  
(22) Anmeldetag: 29. 8. 98  
(43) Offenlegungstag: 5. 3. 98

(71) Anmelder:  
Bruce-Boye, Cecil O., Dr., 23558 Lübeck, DE

(72) Erfinder:  
gleich Anmelder

(56) Entgegenstellungen:

|    |               |
|----|---------------|
| DE | 42 22 339 C2  |
| DE | 41 24 501 C2  |
| DE | 28 02 224 C2  |
| DE | 195 31 692 A1 |
| DE | 195 24 654 A1 |
| DE | 195 16 402 A1 |
| DE | 43 33 804 A1  |
| DE | 41 32 825 A1  |
| DE | 38 33 881 A1  |

|    |              |
|----|--------------|
| DD | 50 897       |
| US | 48 80 518 A  |
| US | 44 37 045    |
| EP | 04 33 481 A1 |

ISERMANN,Rolf,BÜBHARDT: Selbsteinstellende  
Radaufhängung. In: at - Automatisierungstechnik 44,  
1996, 7, S. 351-358;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

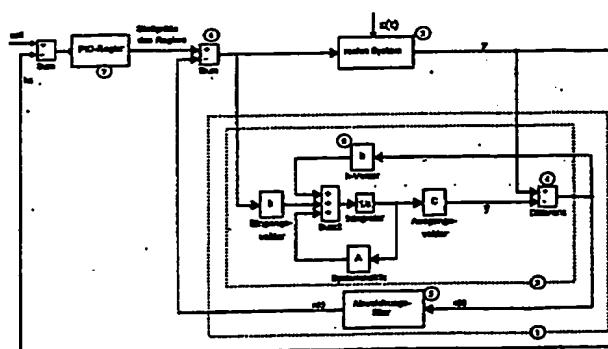
Der Inhalt dieser Schrift weicht von den am Anmeldetag eingereichten Unterlagen ab

(54) Linearisierung nichtlinearer technischer Prozesse mit Hilfe eines Abweichungsbeobachter

(57) Ist der technische Prozeß nichtlinear (im folgenden auch als reales System bezeichnet), wie beispielsweise das Moment einer fremderregten Gleichstrommaschine im Feldschwächebereich, oder das Bewegungsverhalten eines Mehrachsenroboters, so wird bisher durch eine Linearisierung um einen Arbeitspunkt eine Lösung gesucht. Dieser Weg ist aufwendig und hat oft einen stark eingeschränkten Arbeitsbereich zur Folge. Hinzu kommen oft noch zusätzliche nichtlineare Glieder und entsprechende Umschaltmechanismen, die dafür sorgen, daß im richtigen Augenblick die richtigen Reglerdaten zur Wirkung kommen. In vielen Fällen versagen diese Verfahren, wenn die Streckenparameter ungenau bekannt sind oder wenn sie sich während des Betriebes wesentlich ändern.

Das neue Verfahren arbeitet mit den linearen Eigenschaften des realen Systems und benötigt keine Umschaltmechanismen. Darüber hinaus ist es vom Ansatz her unempfindlich gegenüber ungenau bekannten Streckenparametern oder Veränderungen der Streckenparameter während des Betriebes. Der Realisierungsaufwand ist gering. Der Arbeitsbereich ist groß und wird lediglich durch die sinnvolle Begrenzung der Stellglieder (z. B. Stromrichter) eingeschränkt.

Mit Hilfe des Abweichungsbeobachters 1 (siehe Bild 1) mit AbweichungsfILTER 5, kann man ein reales System 2 (nichtlinearer technischer Prozeß) ein dynamisches Verhalten in Form eines Wunschmodells 3 aufzwingen. Das Wunschmodell besitzt nur die linearen Eigenschaften des realen Systems. Die ...



DE 196 34 923 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 01.98 702 070/268

10/25

DE 196 34 923 A 1

## Beschreibung

Grundsätzlich sind alle technische Prozesse nichtlinear (Lehrbuch, Reuter "Regelungstechnik für Ingenieure", 1991, Vieweg-Verlag, Seite 218). Bei schwach nichtlinearen Prozessen kann diese Eigenschaft einfach ignoriert werden, und man erzielt bei der Regelung dieser Prozesse, wie die Praxis zeigt, trotzdem zufriedenstellende Ergebnisse. Ist der technische Prozeß jedoch hochgradig nichtlinear (im folgenden auch als reales System bezeichnet), wie beispielsweise das Moment einer fremderregten Gleichstrommaschine im Feldschwächbereich (Lehrbuch, Dirk Schröder, "Elektrische Antriebe 2", 1995, Springer Verlag, Seiten 314 bis 333) oder Gleichstromhauptantriebe in Feldschwächbereich (Handbuch, H. Rentzsch, "Elektromotoren", 1992, ABB, Seiten 290 bis 291) oder das Bewegungsverhalten eines Mehrachsenroboters (Zeitschrift "Regelungstechnik", 28, 1980, E. Freund und H. Hoyer, Seiten 80–87 und 116–126), so wird bisher durch eine Linearisierung um einen Arbeitspunkt, eine Lösung gesucht. Dieser Weg ist aufwendig und hat oft einen stark eingeschränkten Arbeitsbereich zur Folge. Will man trotzdem einen größeren Arbeitsbereich abdecken, so muß ein sogen. Kennfeld z. B. experimentell erstellt werden, in dem die geeigneten Reglerdaten für die jeweiligen Arbeitspunkte abgelegt sind. Hinzu kommen oft noch zusätzliche nichtlineare Glieder und entsprechende Umschaltmechanismen, die dafür sorgen, daß im richtigen Augenblick die richtigen Reglerdaten zur Wirkung kommen (Lehrbuch, Dirk Schröder, "Elektrische Antriebe 2", 1995, Springer Verlag, Seiten 318 bis 333 und 368 bis 374). In vielen Fällen versagen diese Verfahren, wenn die Streckenparameter ungenau bekannt sind oder wenn sie sich während des Betriebes wesentlich ändern. Selbst der Einsatz sogen. Fuzzy-Regler (Fachbuch, Thomas Tilli, "Automatisierung mit Fuzzy-Logik", Franzis-Verlag, 1992, Seite 223 bis 224) führt in diesem Fall zu einem explosionsartigen Anwachsen der benötigten Regeln, was einen hohen Realisierungsaufwand mit sich bringt (Zeitschrift "Automatisierungstechnik", 6, 1994, G. Ludyk, G.-J. Menken, Seiten 264).

Dem im Patentanspruch angegebenen Verfahren liegt das Problem zugrunde, eine große Zahl von Verfahren zur Linearisierung technischer Prozesse, die jeweils sehr komplizierte und aufwendige Einzellösungen darstellen, auf ein vereinfachtes Verfahren zu vermindern.

Mit Hilfe des Abweichungsbeobachters 1 (siehe Bild 1) mit Abweichungsfilter 5, kann man einem realen System 2 ein dynamisches Verhalten in Form eines Wunschmodells 3 aufzwingen. Die Differenz 4 zwischen dem realen System und dem Wunschmodells wird als Fehler  $e(t)$  interpretiert und über das Abweichungsfilter 5, kompensierend 6, dem realen System aufgeschaltet. Es findet auf diese Weise eine Linearisierung statt. Eine übergeordnete Regelung 7 kann dann so entworfen werden, als wäre das reale System zusammen mit dem Abweichungsbeobachter linear. Der Abweichungsbeobachter wird aus analogen Bauelementen (Analogrechner) oder als Algorithmus in einem digitalen Rechner realisiert. Der Aufbau des Abweichungsbeobachters basiert auf dem Prinzip des Luenberger-Beobachters. Der Luenberger-Beobachter (Lehrbuch, Otto Föllinger, "Regelungstechnik", Hüthig-Verlag, 1994, Seite 501 bis 505) ist jedoch nur für lineare Systeme definiert. Ferner wird der Abweichungsbeobachter nicht aus einem exakten Prozeßmodell wie der Luenberger-Beobachter ge-

bildet, sondern aus einem Wunschmodell. Im Gegensatz zum Luenberger-Beobachter werden hier auch keine Zustandsvariablen rekonstruiert, sondern Abweichungen zwischen dem realen System und dem im Abweichungsbeobachter innenwohnenden Wunschmodell. Das Wunschmodell 3 sollte als Zustandsraummodell (Lehrbuch, H. Unbehauen, "Regelungstechnik II", 1993, Vieweg-Verlag), (Lehrbuch, E. Freund, Regelungssysteme im Zustandsraum, 1987, Oldenbourg-Verlag, Seiten 25 bis 36) in Form von  $A = \text{Systemmatrix}$ ,  $b = \text{Eingangsvektor}$  und  $c = \text{Ausgangsvektor oder Meßvektor}$  beschrieben werden. Es kann analytisch und/oder experimentell z. B. mit einer rechnergestützten Identifikationssoftware ermittelt werden. Für eine stabile Berechnung des Fehlers sorgen die Verstärkungsfaktoren 8 in dem Beobachterverstärkungsvektor =  $h$ . Wie die Zeichnung weiterhin zeigt, werden dazu das reale System und der Abweichungsbeobachter parallel geschaltet; das heißt das reale System und der Abweichungsbeobachter (bzw. sein Eingangsvektor  $b$ ) werden mit denselben Stellgrößen, was von einem übergeordneten gängigen Regler (PID-, Zustands-, Fuzzy-Regler, etc.) kommt, angeregt. Zur Ermittlung der Abweichung wird eine geeignete Meßgröße  $y$  des realen Systems, z. B. das Moment auf der Motorwelle (mit Hilfe einer Momentenmeßwelle), mit der zugehörigen Ausgangsgröße des Wunschmodells  $\hat{y}$  verglichen, indem man bei 4 die Differenz ( $y - \hat{y}$ ) bildet. Diese Differenz wird über den  $h$  Vektor verstärkt und in das Wunschmodell zurückgekoppelt. Dort sorgt diese Rückkopplung, wie bereits erwähnt, zunächst für eine stabile Berechnung des Fehlers  $e(t)$ . Dieser bleibende Fehler wird mit Hilfe des Abweichungsfilters 5 auf die Abweichungsgröße  $a(t)$  verstärkt und über die Summierstelle 6 dem realen System kompensierend aufgeschaltet. Das Abweichungsfilter  $p$  kann analytisch

$$p = [c^T(hc^T - A)^{-1}b]^{-1} \quad (1)$$

oder auch experimentell (man beginnt mit sehr kleinen Werten von  $p$  und vergrößert diese schrittweise, bis sich zufriedenstellende Ergebnisse einstellen) bestimmt werden. Abweichungen zwischen realen System und dem Modell werden auf diese Weise dynamisch eliminiert. Enthält das Wunschmodell beispielsweise nur die linearen Eigenschaften des realen Systems, dann findet durch dieses Verfahren eine Linearisierung des Gesamtsystems (reales System plus Abweichungsbeobachter) statt. Das Wunschmodell sollte dennoch die wichtigsten linearen Eigenschaften des nichtlinearen technischen Prozesses beschreiben. Zum Beispiel besitzen die translatorischen (Position  $x(t)$ ) und rotatorischen (Winkel  $\varphi(t)$ ) Bewegungen eines Manipulators oder Roboters jeweils doppeltes integrales Verhalten (sie werden durch das Newtonsche Gesetz  $F = m \cdot a$  bzw.  $M = J \cdot \alpha$ , mit  $F = \text{beschleunigende Kraft}$ ,  $m = \text{Masse}$ ,  $a = \text{Beschleunigung}$ ,  $M = \text{beschleunigendes Moment}$ ,  $J = \text{Trägheitsmoment}$  und  $\alpha = \text{Winkelbeschleunigung}$  beschrieben). Diese Systemeigenschaften sollen gemäß der obigen Gleichungen im Wunschmodell enthalten sein. Die nichtlinearen Eigenschaften des realen Systems wie Coriolis-Moment, Zentrifugalkraft und Reibung hingegen können bei der Erstellung des Wunschmodells entfallen. Somit besteht das Wunschmodell nur aus den linearen Systemeigenschaften, die mit dem oben erwähnten Newtonschen Gesetz hinreichend beschrieben sind. Auf diese Weise ist es möglich, die störenden nichtlinearen Effekte, die die Kontrolle der Be-

wegungsabläufe des technischen Prozeß (Roboter) erschweren, zu eliminieren. Die Entwurfsfreiheiten für das Wunschmodell gegenüber dem reale System dürfen jedoch nicht überzogen werden, da sonst das Verfahren wirkungslos bleibt. Eine Linearisierung des realen Systems kann nur wirkungsvoll durchgefahrt werden, solange die Stellennergie (z. B. Stromrichter) nicht ihre Grenzen (z. B. Motorgrenzströme) erreicht hat. Im übergelagerten Regelkreis können dann sämtliche Regelungskonzepte (PID-, Zustands-, Fuzzy-Regler etc.) angewandt werden.

Das neue Verfahren arbeitet ohne Kennfeld und benötigt keine Umschaltmechanismen. Darüber hinaus ist es vom Ansatz her unempfindlich gegenüber ungenau bekannten Streckenparametern oder Veränderungen der Streckenparameter während des Betriebes. Der Realisierungsaufwand ist gering. Der Arbeitsbereich ist groß und wird lediglich durch die sinnvolle Begrenzung der Stellglieder (z. B. Stromrichter) eingeschränkt.

Anwendungsbeispiele sind: Zugkraftregelung (überall dort, wo mit Gleichstrommaschinen über einen großen Drehzahlbereich eine konstante Zugkraft (bzw. Moment) eingehalten werden muß). Das Wunschmodell berechnet sich dann aus dem Motorverhalten im Ankerstellbereich (wo das Moment der Maschine weitestgehend konstant ist über die Drehzahl, wo demnach ein linearer Zusammenhang zwischen diesen Größen besteht). Denn im Feldschwächbereich ist die Gleichstrommaschine hinsichtlich des Momentes ein nichtlineares System. Konstante Zugkräfte werden z. B. auch in der papiererzeugenden Industrie beim automatischen Auf- und Abwickeln von Papierrollen benötigt oder in Walzwerken. Auch Kraftfahrzeugprüfstände müssen zur Simulation von Bergauf- und Bergabfahrten über eine konstante Zugkraftregelung verfügen. Als weiteres Einsatzgebiet ist die Nichtlineare Entkopplung von Mehrachsenrobotern oder NC-Maschinen zu nennen. Das Verfahren kann auch bei der aktiven Kompensation der elastischen Schwingungen beim Verfahren von Verladebrücken (das Starrkörpermodell wird als Wunschmodell entworfen, und die Elastizität ist als abweichendes Verhalten im realen Prozeß enthalten) verwendet werden.

Die prinzipielle Funktionsweise der Linearisierung mit Hilfe des Abweichungsbeobachters wird in dem Bild 1 dargestellt.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden näher beschrieben.

#### Anwendungsbeispiel

Zugkraftregelung eines Fahrzeugrollenprüfstandes der mit einer fremderregten Gleichstrommaschine betrieben wird

#### Grundlagen

Fahrzeugrollenprüfstände werden für Untersuchungen an Kraftfahrzeugen verwendet. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, Versuche bei bestimmten Fahrsituationen durchzuführen.

Fahrzeugrollenprüfstände, wie sie üblicherweise gebaut werden (z. B. Firma Zöllner) bestehen aus zwei Rollensätzen, auf die das Fahrzeug mit seinen antreibenden Rädern gestellt wird. Diese Rollen bilden die Straßenoberfläche nach. Sie werden von einer regelbaren Gleichstrommaschine angetrieben.

Die Realisierung bestimmter Fahrsituationen erfolgt

mit Hilfe verschiedener Regelungskonzepte. Eine Betriebsart des Rollenprüfstandes ist die Zugkraftregelung, die dazu dient, unterschiedliche Belastungen, die während einer Geradeausfahrt und/oder Bergauf- und Bergabfahrt auf das Fahrzeug wirken, nachzubilden.

#### Definition des Begriffs "Zugkraft":

Bei der Geradeausfahrt wirken dem Fahrzeug Kräfte entgegen. Sie entstehen u. a. aus dem Fahrtwind, der quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt, aus der Massenträgheit des Autos bei einer Beschleunigungsänderung, aus der auftretenden Reibung zwischen Straßenoberfläche und dem Fahrzeugrad oder auch durch die Fahrbahnneigung.

Diese Kräfte werden auf die drehenden Rollen des Prüfstandes übertragen und stellen dort eine rotatorische Bewegung dar. Die dabei an der Rollenoberfläche erzeugte Kraft wird als Zugkraft bezeichnet. Sie wirkt für die Antriebsräder des Autos als Gegenkraft und belastet das Fahrzeug mechanisch.

Mit dem Bild 2 soll der Zusammenhang zwischen Kraft und Moment an einer Rolle erläutert werden.

Für das Drehmoment gilt die Definition:

$$M = F \cdot r$$

mit:  $M$  = Drehmoment in [Nm]

$F$  = Kraft in [N]

$r$  = Wirkabstand (Rollenradius) in [m]

Das Produkt aus Kraft  $F$  und Wirkabstand  $r$  heißt Drehmoment. Der Wirkabstand ist der senkrechte Abstand zwischen dem Drehpunkt (Achse) und der Wirkungslinie der Kraft  $F$  und entspricht dem Rollenradius.

An der Achse der die Rollen antreibenden Gleichstrommaschine muß somit ein Drehmoment erzeugt werden. Aus diesem Grund wird für die Gleichstrommaschine eine Drehmomentregelung entworfen, die in der Praxis allgemein als Zugkraftregelung bezeichnet wird.

Die Entwicklung neuer Regelungskonzepte erfordert eine Erprobung am Rollenprüfstand. Eine reale Anlage steht hierfür allerdings nicht ständig zur Verfügung. Deshalb werden die Regelungskonzepte an einer Modellanlage erprobt, die einem Fahrzeugrollenprüfstand im Maßstab 1 : 50 elektrisch nachgebildet ist, so daß eine Übertragung auf die reale Anlage gegeben ist.

#### Beschreibung der Modellanlage

Die Modellanlage läßt sich in folgende Bereiche unterteilen:

- mechanischer Aufbau
- Ansteuerung und Regelung der Maschinen
- Meßwertaufnahme und Verarbeitung

#### Mechanischer Aufbau

Zunächst wird der mechanische Aufbau der Modellanlage anhand des Bildes 3 vorgestellt. Die Modellanlage ist aus zwei identischen Maschinensätzen aufgebaut, die auf Grundrahmen montiert und regelungstechnisch miteinander gekoppelt sind. Jeder Maschinensatz bezieht sich auf ein antreibendes Fahrzeugrad.

Die Zusammensetzung eines Stranges wird nachfolgend erläutert

Die Belastung des Fahrzeugs durch die Rollen des Fahrzeugrollenprüfstandes wird an der Modellanlage

durch eine fremderregte Gleichstrommaschine (1 kW Nennleistung) elektrisch nachgebildet.

Mit einer Asynchronmaschine (3 KW Nennleistung) läßt sich das Fahrzeug, das auf dem Prüfstand steht, elektrisch simulieren. Beide Maschinen sind über Wellen und Kupplungen mechanisch gekoppelt und können somit aufeinander einwirken.

Zwischen den Maschinen befindet sich ein Schwungmassensatz, der der mechanischen Nachbildung der Fahrzeuggmasse dient und in verschiedenen Abstufungen (1 : 2 : 4) variiert ist. Diese Schwungmasse ist für das auf dem Prüfstand feststehende Fahrzeug erforderlich; da sich durch seine Masse aber bei einer Beschleunigungsänderung eine Trägheit ergibt, ist diese auf den Prüfstand zu übertragen.

Die Zugkraft wird über eine Drehmomentmeßwelle gemessen, die sich zwischen dem Schwungmassensatz und der Gleichstrommaschine befindet. Sie ist freischwebend zwischen zwei Kupplungsflanschen aufgehängt.

Diese Meßwelle wird während des Betriebes auf Torsion beansprucht. Dabei ist der auftretende Torsionswinkel proportional zum Drehmoment. Die Drehmomentmeßwelle ist mit Dehnungsmeßstreifen und einer Auswertelektronik ausgerüstet. Eine Torsionsbeanspruchung der Meßwelle hat eine Widerstandsänderung der Dehnungsmeßstreifen zur Folge. Mit Hilfe der Auswertelektronik wird ein analoger Spannungswert als Meßgröße erzeugt, der proportional zum Drehmoment ist.

Die verwendeten Meßwellen haben einen maximalen Meßbereich von  $\pm 20$  Nm, welches einem Spannungswert von  $\pm 10$  V entspricht. Ihr Meßfehler beträgt  $\pm 0.2\%$  vom Endwert und wird durch Nichtlinearität und Hysterese hervorgerufen. Dieser Wert entspricht einem absoluten Fehler von  $M = 0.04$  Nm.

Der Meßbereich der Drehmomentmeßwelle ist allerdings an der Modellanlage auf  $M = \pm 5$  Nm begrenzt worden, da während des Betriebes durch Resonanzschwingungen Zugkräfte auftreten, die ein Vielfaches des Nennmomentes der Modellanlage ( $M_n = 4,233$  Nm) betragen können.

Der sich an der Asynchronmaschine befindliche Inkrementalgeber mit einer Auflösung von 4096 Impulsen/Umdrehung dient dazu, andere für die Regelung erforderliche Meßgrößen wie Drehzahlen, Beschleunigungen oder den Phasenwinkel der Maschinensätze zueinander zu ermitteln.

Der vollständige Signalverlauf der Modellanlage ist in Bild 4 dargestellt.

#### Ansteuerung und Regelung der Maschinen

Die Ansteuerung der Maschinen in Bild 4 erfolgt über Stromrichter mit Feldspeisegerät bzw. über einen Frequenzumrichter.

Die zwei fremderregten Gleichstrommaschinen werden jeweils durch einen Stromrichter der Firma Siemens (Simoreg K 6RA23) gespeist. Der Betrieb im Feldschwächebereich wird mit Hilfe der Feldwicklung realisiert, die über ein separates Feldspeisegerät (Minireg F10) versorgt wird.

Die Ansteuerung der beiden Asynchronmaschinen erfolgt über Frequenzumrichter der Firma AEG (Mikrokonverter MV 7,6), wobei die Maschinen sowohl drehzahl- als auch drehmomentgeregt betrieben werden können.

Die Regelung der Maschinen wird mit Hilfe der Soft-

ware Matlab/Simulink durchgeführt. Eine Echtzeitweiterung übernimmt die Verbindung zur Modellanlage. Die Gleichstrommaschine wird über einen Rollenrechner, die Asynchronmaschine über einen Signalprozessor angesprochen.

#### Meßwertermittlung

Die Messung des auftretenden Drehmoments am Maschinenstrang übernimmt die Momentenmeßwelle, die sich zwischen der Gleichstrommaschine und dem Schwungmassensatz befindet.

Alle anderen für die unterschiedlichen Regelkonzepte erforderlichen Größen, wie Drehzahl, Beschleunigung und Phasenwinkel der beiden Maschinensätze zueinander, werden aus den Inkrementen zweier Inkrementalgeber, die sich jeweils an der Asynchronmaschine eines Maschinensatzes befinden, ermittelt. Die Auswertung der Inkrementalgeber signale übernimmt eine Meßbox mit Microcontroller. Zunächst erfolgt die Übertragung der Inkrementalgeber signale zur Vorverarbeitung an die Meßbox. Anschließend werden die daraus resultierenden Informationen seriell über eine RS 232-Schnittstelle an den Rollenrechner (Prozeßrechner) mit intelligenter Einstektkarte (PC Modul 537) bzw. an den Signalprozessor mit einer seriellen Karte (DS 4201) zur Weiterverarbeitung übergeben. Hier berechnet man die Drehzahlen, Beschleunigungen und Phasenwinkel aus den jeweiligen von der Meßbox zur Verfügung gestellten Datensätzen.

#### Anforderungen an die Regelung

Die Zugkraftregelung eines Prüfstandes unterliegt bestimmten Anforderungen. Diese Forderungen werden u. a. von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) aufgestellt.

Weitere Anforderungen wie hohe Ansprüche an die Genauigkeit der Regelung erheben die Anwender der Prüfstände (z. B. Mercedes Benz, Volkswagen AG).

Die Forderung der EPA lautet:

— Der Istwert muß in einer Zeit von 100 ms den Sollwert zu 90% erreicht haben (Anregelzeit).

Zur Bestimmung der Genauigkeit einer Regelung wird in der Regelungstechnik ein Toleranzband verwendet. Seine Breite steht in engem Bezug zur Anregelzeit. Da die Anregelzeit nach EPA auf 100 ms festgelegt ist, läßt sich zunächst ein Toleranzband von  $\pm 10\%$  ableiten. Die Forderungen der Anwender gehen aber für die Genauigkeit mit einem Toleranzband von weniger als  $\pm 1\%$  weit über die EPA-Spezifikation hinaus.

Um allen Forderungen gerecht zu werden, wurden bei der Entwicklung der unterschiedlichen Konzepte zwei weitere Anforderungen an die Zugkraftregelung gestellt.

#### Regelungsstruktur für die Zugkraftregelung ohne Abweichungsbeobachter nach Bild 5

#### Untersuchung der Regeleinrichtung

Es folgt die Aufzeichnung des Momentenverlaufes der zugkraftgeregelt betriebenen Gleichstrommaschine mit einer herkömmlichen Drehmomentregelung (PI-Regler).

In dem Bild 6 wird die Gleichstrommaschine mit ei-

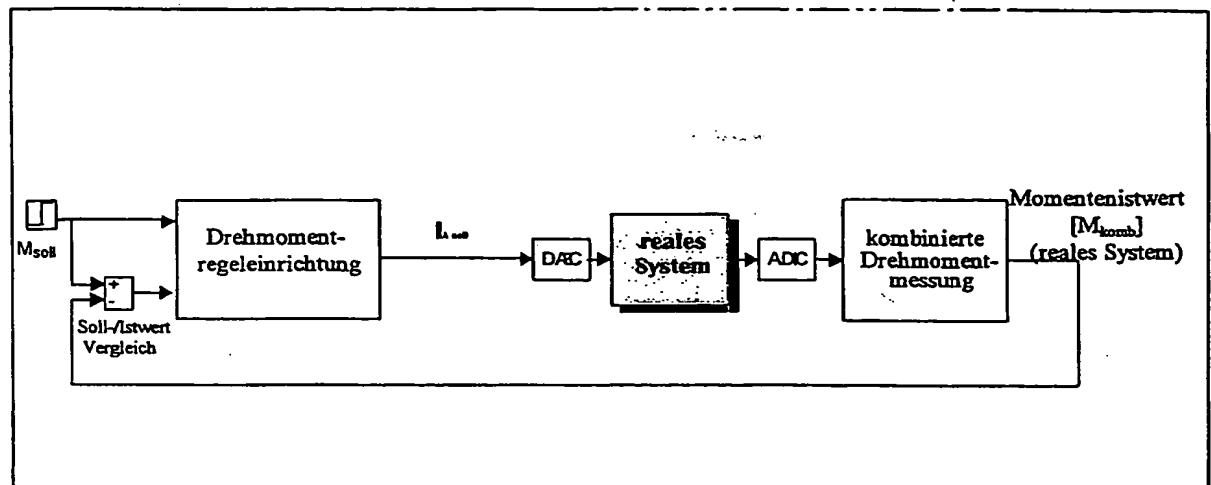


Bild 5: Zugkraftregelung ohne Abweichungsbeobachter

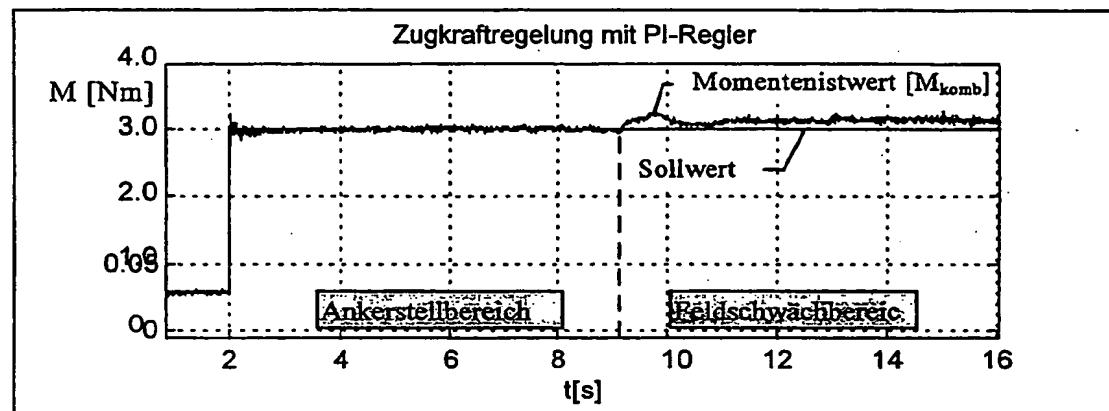


Bild 6 : Drehmomentprofil der Zugkraftregelung ohne Abweichungsbeobachter

-405-

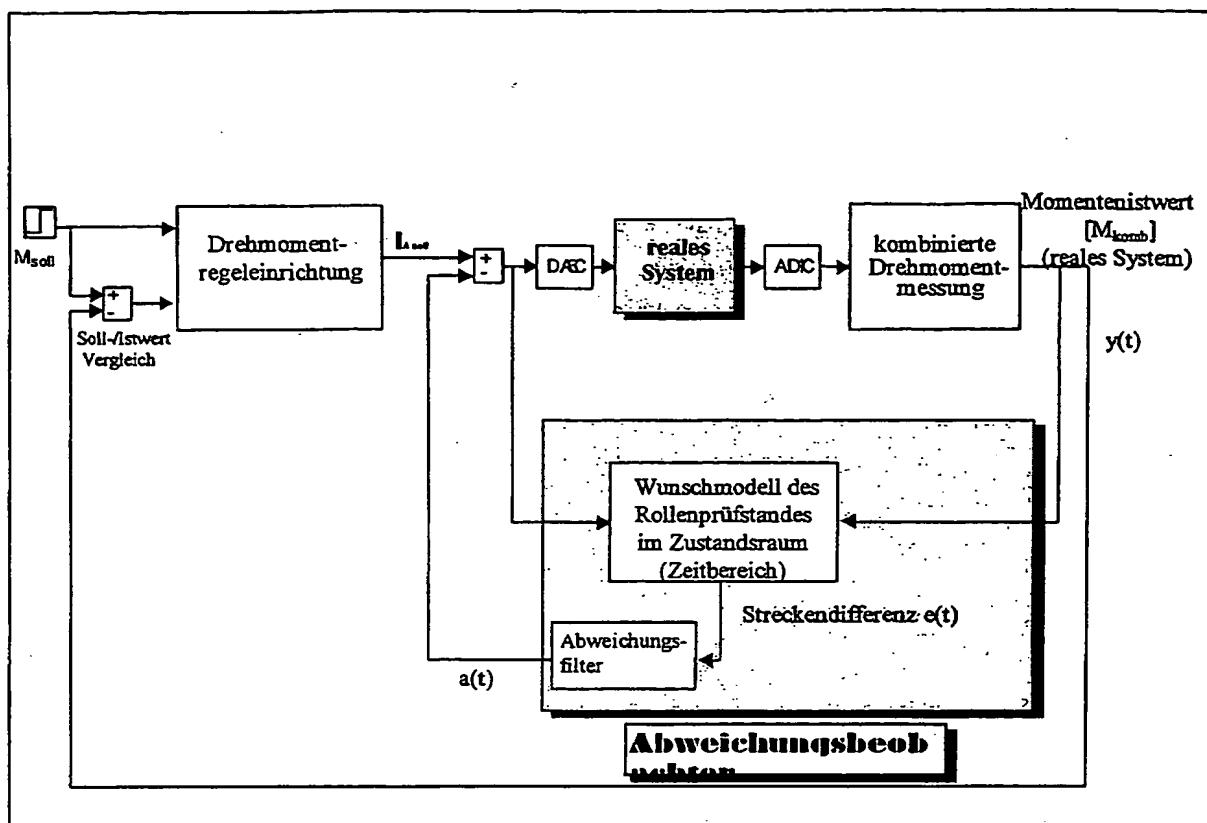


Bild 7: Zukraftregelung mit Abweichungsbeobachter

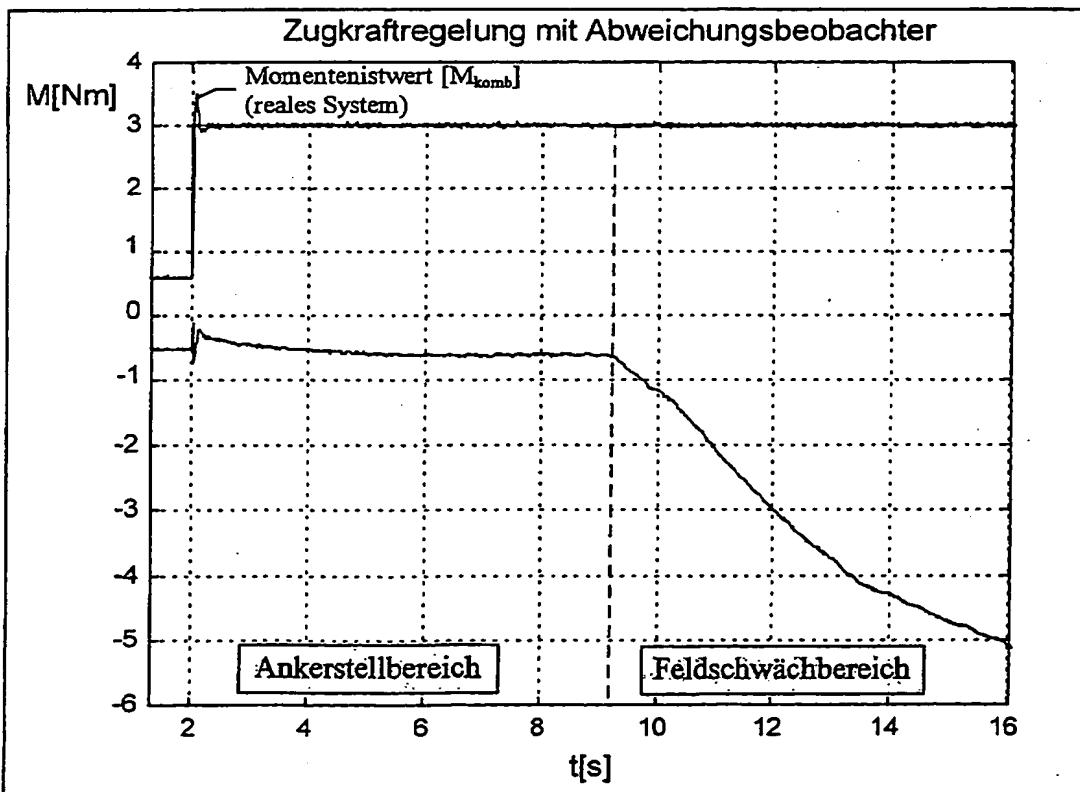


Bild 8: Drehmomentenprofil der Zugkraftregelung mit Abweichungsbeobachter

ner konstanten Sollvorgabe sowohl im Ankerstellbereich als auch im Feldschwächbereich betrieben.

Es ist der Momentenverlauf in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Der Übergang in den Feldschwächbereich erfolgt nach einer Zeit von etwa 9 Sekunden. Im Momentenverlauf kann man von diesem Zeitpunkt an eine bleibende Regelabweichung zwischen Ist- und Sollwert erkennen. Sie wird durch den nichtlinearen Drehmomentabfall der Gleichstrommaschine im Feldschwächbereich hervorgerufen.

#### Zugkraftregelung eines Rollenprüfstandes mit einem Abweichungsbeobachter

Die Struktur der gesamten Zugkraftregelung mit Abweichungsbeobachter ist in Bild 7 dargestellt.

Der unterlagerte Regelkreis beinhaltet einen Abweichungsbeobachter, der die Aufgabe hat, störende Einflüsse zu erfassen und diese durch Aufschalten auf den Streckeneingang des realen Systems zu beseitigen. Damit soll ein gleichbleibend gutes Regelverhalten sowohl im Ankerstellbereich als auch im Feldschwächbereich der Gleichstrommaschine erzielt werden. Die überlagerte Drehmomentregeleinrichtung kann dann für ein lineares, störungsfreies System ausgelegt werden.

Die Bestimmung der Parameter des Abweichungsbeobachters ist folgendermaßen vorgenommen worden:

- 1) Für das Zustandsraummodell wurde zunächst eine rechnergestützte Systemidentifikation durchgeführt, um das Modell des Rollenprüfstandes im Frequenzbereich zu ermitteln.
- 2) Unter Matlab (Softwarepaket) konnten im Anschluß mit Hilfe der "Control-Tool-Box" über ein "m-File" die Parameter für den Abweichungsbeobachter bestimmt werden.
- 3) Eine geeignete Lage der Eigenwerte ist experimentell ermittelt worden, um ein gutes Regelverhalten in Bezug auf Einschwingverhalten und stationäre Genauigkeit der Zugkraftregelung zu erzielen.

Es wurde das konjugiert-komplexe Eigenwertpaar  $\lambda_{1,2} = -43 \pm j14$  gewählt.

Mit dem oben gewählten Eigenwertpaar ergaben sich für den Beobachtungsvektor  $h$  und das AbweichungsfILTER  $p$  (siehe Gleichung (1)) folgende Werte:

$$h = \begin{vmatrix} -0.8392 \\ 0.0004 \end{vmatrix} \quad p = 0.5862$$

#### Zugkraftregelung im gesamten Betriebsbereich

In dem Bild 8 ist der Drehmomentverlauf bei Anregung mit einem konstanten Sollwertsprung auf  $M_{soll} = 3 \text{ Nm}$  über der Zeit dargestellt; zusätzlich ist der Abweichungsverlauf  $a(t)$  am Ausgang des Abweichungsbeobachters abgebildet. Die Gleichstrommaschine wird sowohl im Ankerstellbereich als auch im Feldschwächbereich zugkraftgeregt betrieben.

Der Betriebsbereich erstreckt sich in diesem Fall auch auf den Feldschwächbereich, wo der Drehmomentverlauf der Gleichstrommaschine ein nichtlineares Verhalten, hervorgerufen durch die Verringerung des Maschinenflusses  $\Phi$ , aufweist. Der vorgegebene Sollwert wird im gesamten Betriebsbereich eingehalten. Der Momen-

tenverlauf der Gleichstrommaschine ist qualitativ im Profil der Abweichungsgröße  $a(t)$  wiederzufinden.

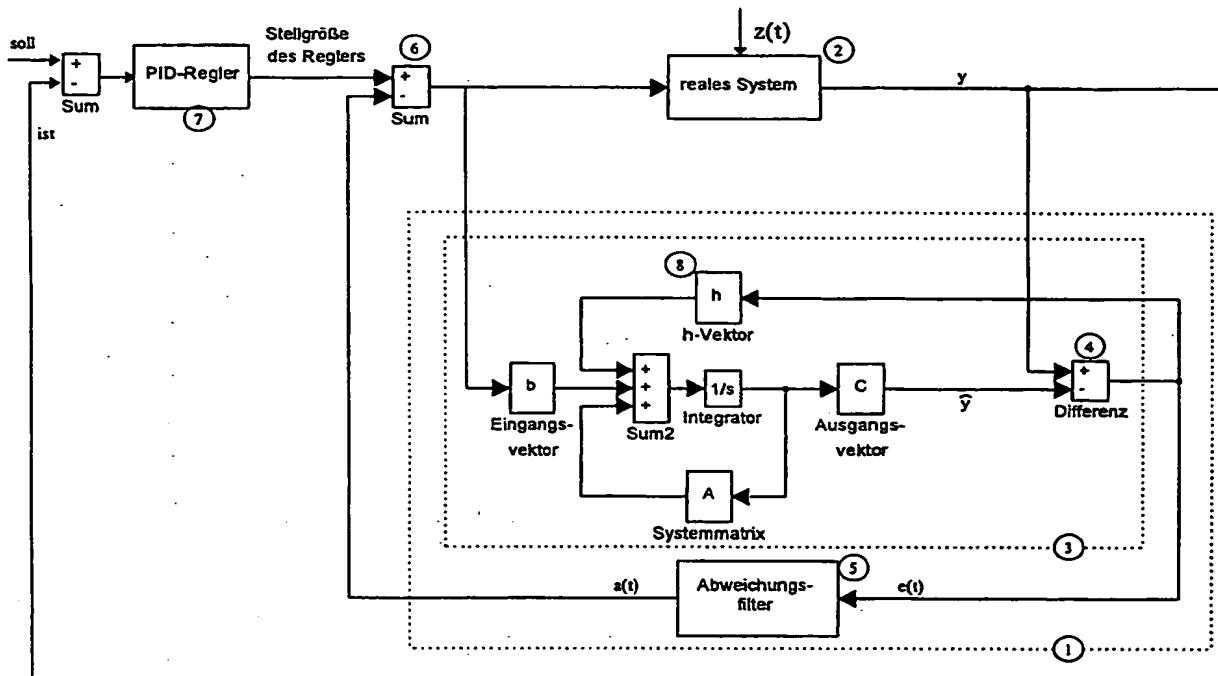
Die Wirkung des Abweichungsbeobachters wird besonders im Feldschwächbereich deutlich. Die Nichtlinearität des Momentenverlaufs wird hier als zusätzliche Regelstellgröße kompensierend aufgeschaltet, so daß der vorgegebene Sollwert ohne bleibende Regelabweichung im gesamten Betriebsbereich vom Momentenwert des realen Systems eingehalten wird.

- 10 Es zeigen
  - Bild 1 Prinzip des Abweichungsbeobachters
  - Bild 2 Definition der Zugkraft
  - Bild 3 Prinzipieller Aufbau der Modellanlage
  - Bild 4 Vollständiger Signalflußplan der Modellanlage
  - Bild 5 Zugkraftregelungs-Struktur ohne Abweichungsbeobachter
  - Bild 6 Drehmomentenprofil der Zugkraftregelung ohne Abweichungsbeobachter
  - Bild 7 Zugkraftregelungs-Struktur mit Abweichungsbeobachter
  - Bild 8 Drehmomentenprofil der Zugkraftregelung mit Abweichungsbeobachter
- 15
- 20
- 25

#### Patentanspruch

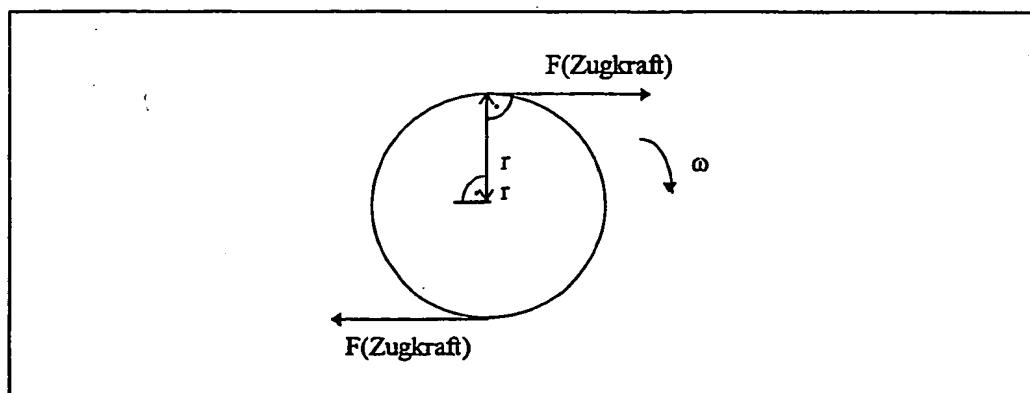
Verfahren zur Regelung von nichtlinearen technischen Prozessen durch die Linearisierung mit einem Abweichungsbeobachter, insbesondere für die Regelung der Zugkraft [Nm] (dem Moment an der Motorwelle) von fremderregten Gleichstrommaschinen im Feldschwächbereich oder Drehstromhauptantriebe im Feldschwächbereich oder zur aktiven Dämpfung von elastischen Schwingungen des Lastseiles einer Verladebrücke oder zur robusten Regelung der Fahrgeschwindigkeit (d. h. unabhängig von der Nutzlast wird ein gleichbleibend gutes Fahrverhalten erzielt) eines elektrisch betriebenen Gabelstellers oder zur nichtlinearen Entkopplung simultan bewegter Achsen eines Mehrachsenroboters, sind dadurch gekennzeichnet, daß durch Parallelschaltung eines Wunschmodells mit dem zugehörigen nichtlinearen technischen Prozeß, der nichtlineare technische Prozeß linearisiert wird. Das Wunschmodell ist im Abweichungsbeobachter integriert und es besitzt nur die linearen Anteile des technischen Prozesses und/oder einen repräsentativen Betriebsfall. Das Verhalten des Wunschmodells wird auf diese Weise dem nichtlinearen technischen Prozeß aufgezwungen.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen



385

Bild 1 Prinzip des Abweichungsbeobachters



390

Bild 2 Definition der Zugkraft

Legende:  $F$  = Angreifende Kraft an der Rollenoberfläche (Zugkraft)

$r$  = senkrechter Wirkabstand der angreifenden Kraft zur rotierenden Achse (Drehpunkt)

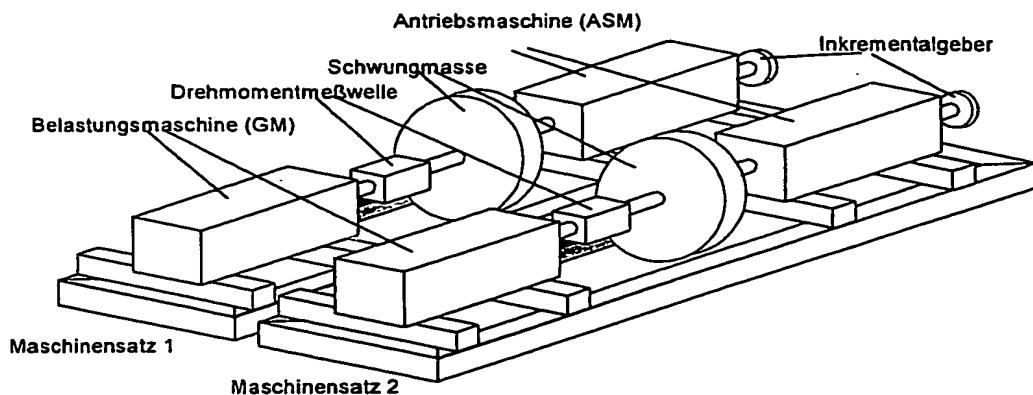
**Skizze Modellaufbau**

Bild 3 Prinzipieller Aufbau der Modellanlage: GM=Gleichstrommaschine,  
ASM=Asynchronmaschine

395

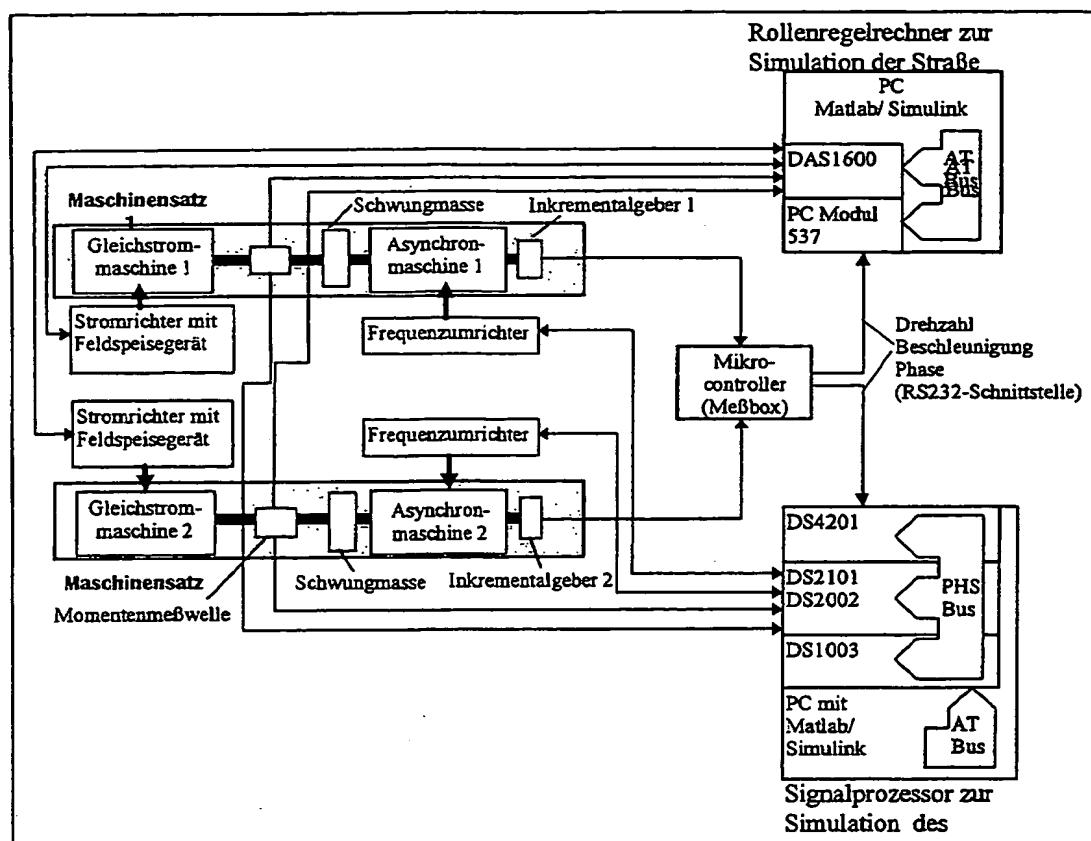


Bild 4: Vollständiger Signalverlauf der Modellanlage

Legende :

- DAS 1601 : DA/AD - Wanderkarte
- PC Modul 537 : serielle Schnittstelle des PC's
- AT-Bus : interner Datenbus des PC's
- PHS-Bus : interner Datenbus des Signalprozessors
- DS 4201 : serielle Schnittstelle des Signalprozessors
- DS 2101 : ADC - Board
- DS 2102 : DAC - Board
- DS 1003 : Prozessor - Board

400